

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТРУЙНОГО КОМПРЕССОРА В ANSYS FLUENT С КОНТРОЛЕМ АДЕКВАТНОСТИ РАСЧЕТОВ**

### **Аннотация**

*В данной работе приводятся расчёты основных параметров струйного парового компрессора с помощью методов численного моделирования в программном продукте Ansys Fluent [1], адекватность которых затем проверяется с помощью аналитической модели [2]. Геометрия проточной части аппарата была задана на основании предварительного конструктивного расчёта [2]. Построенные с помощью Ansys Fluent поля температур и чисел Маха в продольном сечении струйного парового компрессора соответствуют основным законам механики и термодинамики сплошных сред. Был определён диапазон числа Куранта в решателе Ansys Fluent, при котором возможно нахождение правильного решения. Рассчитанные коэффициент инжекции и температура смешанного потока на выходе из аппарата по обеим методикам совпали с достаточной точностью, что позволяет использовать численное моделирование для инженерных расчётов.*

*Ключевые слова: струйный компрессор, водяной пар, аналитическая модель, численное моделирование, коэффициент инжекции, температура, число Куранта.*

### **Abstract**

*The article includes calculation of the key parameters of the steam jet compressor using numerical simulation in the Ansys Fluent CFD code [1]. The numerical results were then tried and tested using analytical model [2]. The apparatus flow channel geometry was specified on the basis of the preliminary design simulation carried out in [2]. The contours of temperature and Mach number in the steam jet compressor longitudinal cross section plotted in the Ansys Fluent are in well agreement with flow mechanics and thermodynamics. The Courant number diapason for obtaining proper solution in the Ansys Fluent solver was determined. The entrainment ratio and mixed flow temperature at the apparatus outlet simulated using both methods agreed well enough with each other allowing us to use the CFD modelling for engineering analysis.*

*Keywords: jet compressor, water vapor, analytical model, numerical simulation, entrainment ratio, temperature, Courant number.*

### **Введение**

Газофазные струйные аппараты сегодня используются в таких отраслях промышленности, как, например, энергетика, машиностроение, металлургия и химическое производство. Одной из основных моделей для расчёта таких аппаратов является одномерная полуэмпирическая аналитическая модель, описанная в [2]. Большим недостатком данной модели является необходимость подбора коэффициентов скорости потоков, что требует проведения экспериментов. Тем временем, информационная революция вывела на современный рынок такие программные продукты, как Ansys Fluent, которые позволяют наиболее близко к эксперименту моделировать различные физические процессы в технике.

Целью исследований была проверка методики тестирования адекватности результатов расчёта струйных насосов в пакетах инженерного моделирования. Работа выполнена на кафедре теплоэнергетики и теплотехники УралЭНИН УрФУ при проведении учебных занятий с магистрами по курсу «Научные и инженерные расчёты в современных компьютерных про-

граммах». Методику планируется применить для расширения постановки задач при создании учебно-справочного комплекса моделей базовых объектов технической теплофизики [3, 4].

#### Постановка задачи

Обычно используются два вида постановки задачи по моделированию работы струйного аппарата. В первом случае, известны параметры рабочего и инжектируемого потоков, такие как температура, давление и удельный объём, также известно давление смешанного потока на выходе из аппарата  $P_c$ , необходимо найти коэффициент инжекции аппарата  $u$ :

$$u = \frac{G_n}{G_p}, \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, индексы «р», «н» и «с» означают рабочий, инжектируемый и смешанный потоки, соответственно.

Другой тип задачи при прочих равных условиях предполагает нахождение давления  $P_c$  по известному коэффициенту инжекции аппарата  $u$ .

В данном исследовании рассматривается первый вид постановки задачи. В сопло (4) струйного компрессора, геометрия проточной части которого была задана на основании предварительного конструктивного расчёта [2] и показана на рис. 1, подаётся рабочий поток – водяной пар при температуре  $T_p = 673$  К и давлении  $P_p = 30$  атм. Снизу во всасывающую камеру (1) подаётся инжектируемый поток – водяной пар при температуре  $T_n = 453$  К и давлении  $P_n = 3$  атм. Рабочий поток, расширяясь в сопле Лавалья (4) и на некотором расстоянии после него, разгоняется до сверхзвуковой скорости, создавая разрежение и увлекая инжектируемый поток в камеру смешения (3), где потоки обмениваются энергией. Далее смешанный поток попадает в диффузор (2), где происходит повышение его давления до требуемого значения  $P_c = 6$  атм. Необходимо найти коэффициент инжекции  $u$ , а также температуру смешанного потока  $T_c$  на выходе из аппарата.

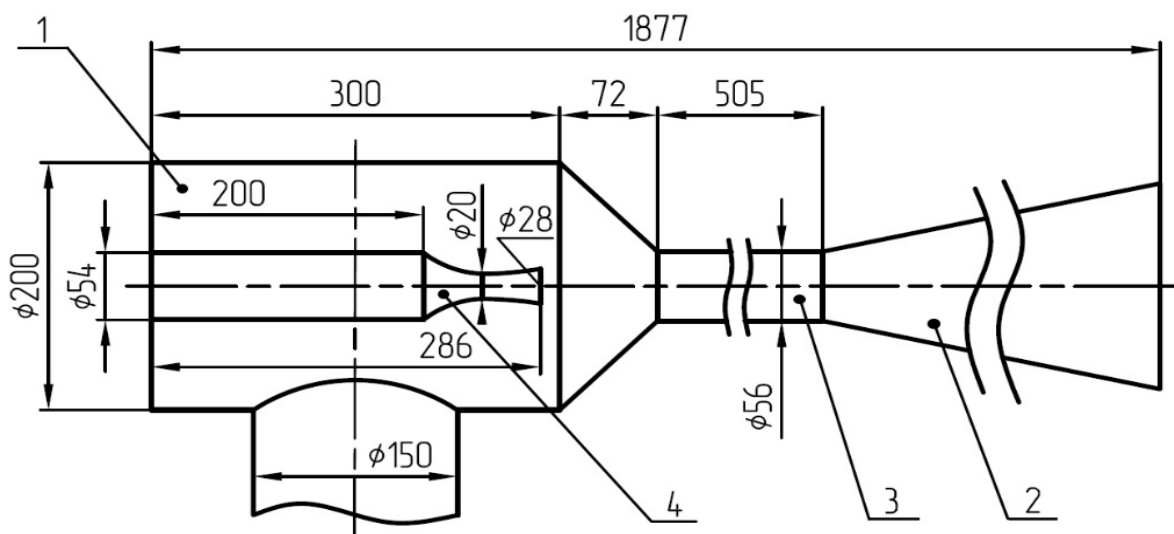


Рис. 1. Геометрия проточной части струйного компрессора

#### Численное моделирование в Ansys Fluent

Данная задача была решена численно в программном пакете Ansys Fluent 12.0 [1]. Геометрия проточной части, показанная на рис. 1, была воссоздана сплошной, и лишь стенка сопла была выполнена в виде полости внутри расчётной области для того, чтобы отделить рабочий поток в сопле (4) от инжектируемого потока во всасывающей камере (1). Число элементов расчётной сетки в модели равнялось 82673. В расчёте водяной пар считался идеальным газом, теплоёмкость рассчитывалась по встроенной в программу полиномиальной зависимости, теплопроводность и динамическая вязкость высчитывались исходя из кинетической теории. Турбулентность моделировалась согласно модели RNG k-epsilon. Наибольшую важность для получения верного решения является указание критерия Куранта (Courant

Number) при настройке решателя. Согласно учебным материалам по Ansys Fluent [5], рекомендованный диапазон значений числа Куранта для задач с течениями на околозвуковых скоростях – от 10 до 100, причём чем выше его значение, тем быстрее алгоритм может найти решение, но тем выше риск возникновения невязок при решении системы балансовых уравнений, особенно при недостаточно подробно построенной сетке. В данном случае решение находилось лишь при значениях числа Куранта не превышающих 3. Это может быть связано с тем, что в районе сверхзвукового сопла скорость потока превышала скорость звука более чем в 2 раза, что сильно усложнило задачу. Критериями нахождения правильного решения в данном случае являлись, во-первых, достижение минимума невязок при решении системы балансовых уравнений, во-вторых, достижение постоянного независимого от номера итерации массового расхода смешанного потока на выходе из эжектора.

В результате численного моделирования было установлено, что массовый расход рабочего потока  $G_p = 1,114$  кг/с, а инжектируемого  $G_n = 0,601$  кг/с, откуда коэффициент инжекции  $i$  равен 0,54. На рис. 2 показано поле температур в продольном сечении моделируемого аппарата в диапазоне от 347 до 673 К. На выходе из сопла видны области с температурой ниже начальной температуры самого холодного, инжектируемого, потока – подобное падение температуры объясняется эффектом Джоуля-Томсона [6]. Средняя же температура смешанного потока  $T_c$  на выходе из струйного компрессора составляет 596 К.

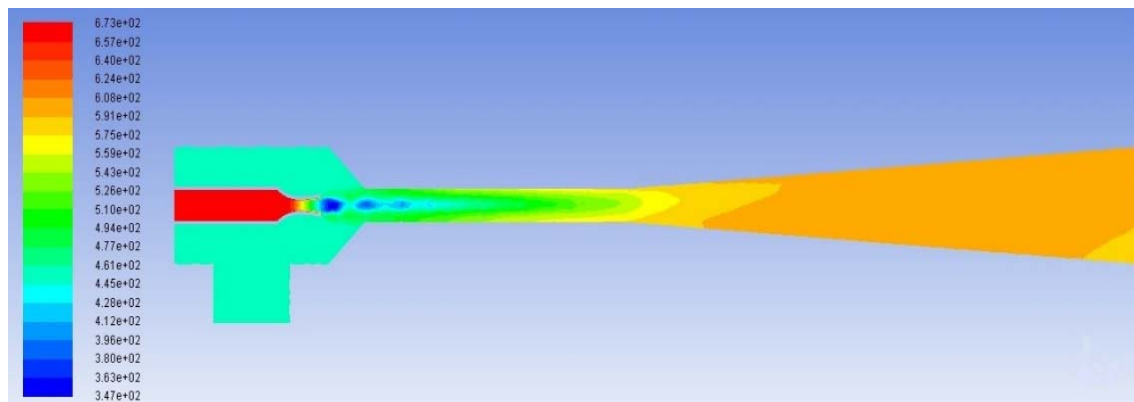


Рис. 2. Поле температур в продольном разрезе проточной части аппарата  
(на шкале слева показана температура в Кельвинах)

На рис. 3 показано поле чисел Маха в продольном сечении моделируемого аппарата в диапазоне от 0,003 до 2,461. Видно, что в сопле Лавалья, а также на некотором расстоянии от него согласно принципу обращения воздействия число Маха превышает 1, то есть поток движется со сверхзвуковой скоростью. Также из этого поля видно, что струя стремится прилипнуть к верхней стенке аппарата согласно эффекту Коанда [6].

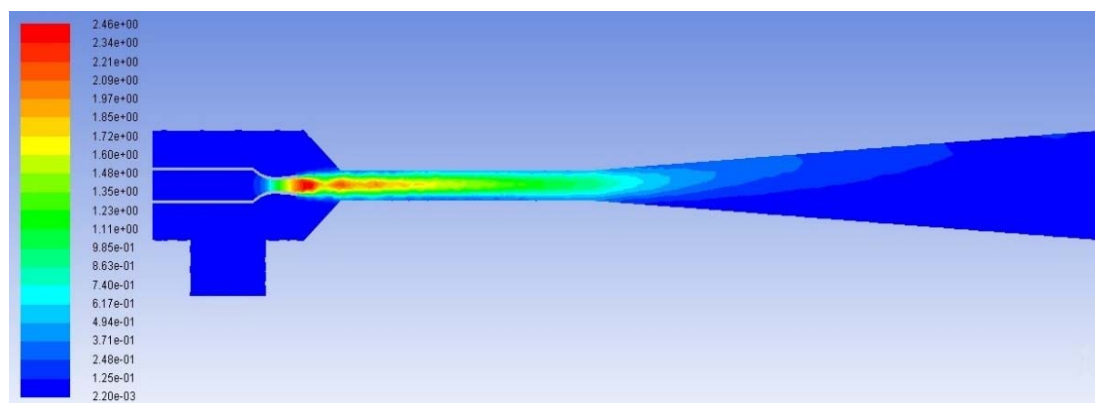


Рис. 3. Поле чисел Маха в продольном разрезе проточной части аппарата  
(на шкале слева показаны величины чисел Маха)

### Проверка адекватности численного решения с помощью аналитической модели

Для проверки адекватности численного решения использовалась аналитическая методика, изложенная в [2]. Коэффициент инжекции  $u$  можно найти из уравнения:

$$\frac{P_c}{P_H} = \frac{1}{\Pi_{c2}} \left\{ \Pi_{p3} \frac{P_p}{P_H} \frac{f_{p3}}{f_2} + \Pi_{H3} \frac{f_{H2}}{f_3} + \frac{k \cdot \Pi_4}{\varphi_d} \frac{P_p}{P_H} \frac{f_{p4}}{f_3} \times \right. \\ \left. \times [K_p \cdot \lambda_{p2} + K_H \cdot u \cdot \sqrt{\theta} \cdot \lambda_{p3} - (1 + u \cdot \sqrt{\theta}) \lambda_{c2}] \right\}, \quad (2)$$

где  $\Pi$  и  $\lambda$  – газодинамические функции: относительное давление и приведённая скорость в сечениях, соответственно;  $f$  – площадь сечения, занимаемого потоком,  $m^2$ ;  $k$  – показатель адиабаты для водяного пара;  $\varphi_d$  – коэффициент скорости диффузора;  $K_p$  – коэффициент скорости рабочего потока;  $K_H$  – коэффициент скорости инжектируемого потока;  $\theta$  – отношение абсолютных температур инжектируемого и рабочего потоков; индексы «2», «3» и «4» означают выходное сечение камеры смешения, входное сечение камеры смешения и критическое сечение сопла, соответственно.

Вычислив коэффициент инжекции, температуру смешанного потока можно найти по формуле:

$$T_c = \frac{T_p + u T_H}{1 + u}. \quad (3)$$

Результатами моделирования являются рассчитанные коэффициент инжекции  $u = 0,55$  и температура смешанного потока на выходе из аппарата  $T_c = 595$  К

### Выводы

Коэффициент инжекции и температура смешанного потока, полученные с помощью аналитической модели и численного моделирования, совпали с достаточной для инженерных расчётов точностью (отклонение от аналитической модели при расчёте коэффициента инжекции 1,8 %; при расчёте температуры смешанного потока – 0,17 %). Построенные в Ansys Fluent поля температур и чисел Маха отражают реальные физические процессы в струйных аппаратах. Также было установлено, что число Куранта, обеспечивающее нахождение правильного решения, не превышает трёх. Следовательно, методика тестирования адекватности результатов расчёта струйных насосов показала, что при правильной настройке решателя Ansys Fluent может быть использован при моделировании работы струйных аппаратов.

### Список использованных источников

1. CAE-система ANSYS [Электронный ресурс] (<http://www.ansys.com/>), актуальность 07.02.2017.
2. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд. переработ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
3. Денисов М.А. Учебно-справочный комплекс тепловых расчётов в пакете ANSYS Multiphysics для проектирования в металлургии // Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса. – Екатеринбург.: Уральский рабочий, 2013. – С. 93-94.
4. Денисов М.А. Разработка учебно-справочного комплекса проектного моделирования в пакете ANSYS Workbench // Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2013. – С. 95-96.
5. Ansys Fluent Tutorial Guide. Chapter 6: Modeling Transient Compressible Flow. Release 16.0, January 2015. P. 1140.
6. Mazzelli F., Little A.B., Garimella S., Bartosiewicz Y. Computational and Experimental Analysis of Supersonic Air Ejector: Turbulence Modeling and Assessment of 3D Effects. International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 56, pp. 305-316, 2015.